



移动阅读

梁建刚, 匡海阳, 曹占宁, 等. 含煤盆地砂岩型铀矿勘查中的地球物理方法——以二连盆地中东部为例[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 208–219. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.08.0555

LIANG Jiangang, KUANG Haiyang, CAO Zhanning, et al. Exploring sandstone-hosted uranium deposits in coal-bearing basins using geophysical methods: A case study of the east-central Erlian Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 208–219. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.08.0555

含煤盆地砂岩型铀矿勘查中的地球物理方法

——以二连盆地中东部为例

梁建刚^{1,2}, 匡海阳^{3,4,5,*}, 曹占宁^{3,4}, 杨为民⁶

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010090; 2. 华北克拉通北缘金矿勘查技术创新基地, 内蒙古 呼和浩特, 010013; 3. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 4. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 5. 中国地质科学院, 北京 100037; 6. 山西省地球物理化学勘查院, 山西 运城 044004)

摘要: 【背景】砂岩型铀矿是我国铀资源增长的关键类型, 广泛分布于陆相及海陆交互相沉积岩中。当前, 我国对其勘查研究多集中于北方中生代沉积盆地。【目的和方法】二连盆地具有“铀-煤-油”共生特点, 以盆地中东部为研究对象, 综合运用区域重力、航磁、航空放射性测量等资料, 同时布设 6 条共 130 km 二维地震剖面, 并采用土壤瞬态测氦法, 剖析砂岩型铀矿关键控矿要素的地质特征与地球物理响应, 构建找矿预测模型, 旨在为含煤区找矿提供技术支撑。【结果】研究发现, 重力反演揭示了基底隆-拗结构与铀矿富集的关系, 航磁、航放明确了蚀源区及铀元素的迁移特征。区域重磁与航放数据识别出苏尼特隆起和巴音宝力格隆起两大蚀源区, 揭示了物源供给边界; 二维地震圈定了含铀砂体和蚀源区构造“天窗”; 氦气测量异常经钻探验证, 在马尼特拗陷南部圈定了一条长约 20 km、宽 1~3 km 新的铀成矿带。【结论】区域重磁与航放数据为宏观成矿背景分析提供了重要依据, 二维地震与氦气测量在含铀砂体定位及矿化异常识别中优势显著。综合运用多种地球物理方法, 实现了多尺度地球物理方法融合, 为含煤盆地砂岩型铀矿找矿突破奠定了坚实基础。

关键词: 砂岩型铀矿; 含煤盆地; 地球物理方法; 二连盆地中东部

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)03-0208-12

Exploring sandstone-hosted uranium deposits in coal-bearing basins using geophysical methods: A case study of the east-central Erlian Basin

LIANG Jiangang^{1,2}, KUANG Haiyang^{3,4,5,*}, CAO Zhanning^{3,4}, YANG Weimin⁶

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010090, China; 2. Innovation Base for Gold Exploration Technology in the Northern Margin of North China Craton, Hohhot 010013, China; 3. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China; 4. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 5. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. Shanxi Geophysics and Geochemical Prospecting Institute, Yuncheng 044004, China)

Abstract: [Background] Sandstone-hosted uranium deposits, critical to the uranium resources growth in China, are extensively distributed in continental and marine-continental transitional sedimentary rocks. Currently, the exploration and research on these deposits in China focus primarily on the Meso-Cenozoic sedimentary basins in the northern regions. [Objective and Methods] The Erlian Basin exhibits the coexistence of uranium, coals, and oil. This study investigated

收稿日期: 2024-08-31; 接收日期: 2025-03-04

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190121-07; DD20211549)

第一作者: 梁建刚, 1980 年生, 男, 山西洪洞人, 硕士, 正高级工程师。E-mail: ljiangang@mail.cgs.gov.cn

*通信作者: 匡海阳, 1986 年生, 男, 四川安岳人, 博士研究生, 高级工程师。E-mail: khaiyang86@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

the east-central part of this basin using multiple geophysical data, including regional gravity survey, aeromagnetic survey, and airborne radioactivity survey (ARS). Furthermore, six 2D seismic profiles totaling 130 km in length were deployed, and instantaneous soil radon measurement as employed. Accordingly, this study analyzed the geological characteristics and geophysical responses of key ore-controlling factors of sandstone-hosted uranium deposits in the region and constructed a prospecting prediction model, aiming to provide technical support for uranium exploration in coal-bearing regions. [Results] Gravity inversion revealed the relationships of the uplift and depression structures in the basement with uranium enrichment, while aeromagnetic survey and ARS determined denudation-related provenance areas and uranium migration patterns. Specifically, the Sonid and Bayinbaolige uplifts were identified as two major provenance areas using regional gravity, magnetic, and aeroradiometric data, with the material supply boundaries delineated. Besides, uranium-bearing sand bodies and the structural skylights of denudation-related provenance areas were delineated using 2D seismic profiling. Through validation of radon anomalies by drilling, this study delineated a new uranium metallogenic belt measuring about 20 km in length and 1–3 km in width in the southern Manite Depression. [Conclusions] Regional gravity, magnetic and aeroradiometric data provide an important basis for the analysis of the macroscopic metallogenic setting, while 2D seismic survey and radon measurement excel in the localization of uranium-bearing sand bodies and the identification of mineralization anomalies. This study, achieving a multi-scale fusion of geophysical methods, lays a robust foundation break through in mineral exploitation of sandstone-hosted uranium resources in coal-bearing basins.

Keywords: sandstone-hosted uranium deposit; coal-bearing basin; geophysical method; east-central Erlian Basin

凭借规模大、成本低、开采污染小等优势,砂岩型铀矿现已成为我国铀资源量增长速度最快和占有比例最高的铀矿床类型,主要产于陆块(地台)或中间地块上的大中型自流盆地以及造山带山间盆地的陆相、海陆交互相沉积岩中,以河流相和三角洲相沉积为主。当前,我国砂岩型铀矿的勘查和研究主要集中在北方中新生代沉积盆地^[1-3]。

近年来,国内外在对砂岩型铀矿的成矿要素的理论研究上逐渐统一认识,认为砂岩型铀矿成矿与铀源、构造、地层、岩性-岩相等密切相关^[4-5];在利用地球物理示踪上述成矿要素等方面开展了大量实践工作,逐步建立了较为完善的综合勘查体系^[6-7]。美国在科罗拉多州和犹他州的帕拉克斯盆地东北部,利用重力配合航磁,查明了前寒武纪基底构造的走向、埋深以及与铀矿分布有关的背斜构造^[4];俄罗斯在西西伯利亚平原进行砂岩型铀矿勘查时,通过航磁测量圈定了与含铀砂岩分布相关的磁性异常区域^[5];哈萨克斯坦在其东部利用航放测量快速获取大面积的放射性异常信息,圈定多个潜在的铀矿化区域^[6];澳大利亚在砂岩型铀矿勘查区,采用二维地震勘探技术,准确确定地下砂体分布范围和形态,识别控制铀矿成矿的断层和褶皱构造^[7];尼日尔在Azelik砂岩型铀矿勘查中,开展土壤氡气测量,发现土壤瞬时测氡结果能反映深部铀矿化信息^[8]。

国内利用重力异常对松辽盆地的基底构造进行了研究,圈定出了与控制铀矿成矿的构造区域,为后续的勘查工作提供了重要的基础资料^[9-10];在新疆伊犁盆地的砂岩型铀矿勘查中,通过航磁异常的解译,识别出了一些断裂构造和磁性体,这些构造和磁性体与铀矿的分

布有一定的相关性,为铀矿勘查提供了找矿线索^[11];中核地质科技石家庄基地在柴达木盆地开展高精度航空物探调查,首次在盆地西部新发现大规模带状航放异常,为该地区的砂岩型铀矿找矿提供了重要线索^[10];中国地质调查局天津地质调查中心和北京核工业研究院砂岩型铀矿勘查通过二维地震、三维地震查明了地下主要含铀砂体的分布和构造特征,为砂岩型铀矿的勘探提供了重要依据^[11];核工业二一六大队在新疆昭苏盆地开展砂岩型铀矿勘查时,采用土壤氡气测量方法,该方法对地下铀矿体有指示作用,辅助解释了断裂构造,与其他物探方法相互补充,提高了物探解释的准确性^[12]。

同时,我国的地球物理工作者也在传统方法的应用方面不断创新,如江民忠等^[13]基于利用微磁信号,汪硕等^[14]利用SIP圈定氧化-还原过渡带,实现铀矿区域定位。

由此可见,基于含铀岩系的地球物理响应特征,重力、磁法、地震法等砂岩型铀矿体综合勘查体系中发挥了重要作用。其中,区域重力、航磁、航放是有效圈定成矿远景区的重要因素;而二维地震勘探和土壤氡气测量对于圈定找矿靶区效果明显,前者可精确示踪“泥-砂-泥”含铀岩系的空间定位,后者更直接反映含铀砂体的产状。

二连盆地为我国北方重要的中新生代沉积盆地,具有“铀-煤-油”共生的资源禀赋。在二连盆地开展砂岩型铀矿勘查,可充分利用铀-煤-油赋存关系。空间上,深度方向砂岩型铀矿多赋存于煤层之上,而且作为煤层顶板的泥岩多成为砂岩型铀矿“泥-砂-泥”结构的底板;水平方向,基于砂岩型铀矿成矿理论,砂岩型铀矿多分布于煤田边界。成矿机理上,煤层在沉积成岩及压实过

程中,可以产生甲烷等烃类气体,形成还原剂,使上覆地层在沉积阶段即具备了一定的还原能力,有利于铀的吸附及预富集。而煤、油烃类气体沿断裂或岩石裂隙上升,又为铀矿二次成矿提供源源不断的还原剂^[15-17]。

基于上述关系,以二连盆地东部为例,利用区域重力、航磁、航放资料及前期煤田勘查阶段的地震、放射性测井数据迅速缩小找矿靶区,找出砂岩型铀矿关键控矿要素地质特征与地球物理响应,总结出相应的技术体系,以期为含煤区开展“煤铀兼探”或煤田资料二次开发寻找砂岩型铀矿提供技术基础。

1 地质背景

1.1 区域地质矿产

二连盆地处于亚洲板块与西伯利亚板块缝合带部位,是中生代后期在华力西褶皱基底和侏罗系残留盆地基础上,经正向断层强烈拉伸、裂陷而形成的一群中、

小盆地群的组合^[18]。二级构造单元划分为“五坳一隆”6个构造单元,分别为北部的川井坳陷、乌兰察布坳陷、马尼特坳陷、南部的腾格尔坳陷、乌尼特坳陷及中间北东向展布的苏尼特隆起。

构造方面,贺根山断裂走向北东,倾向北西,为超岩石圈断裂,控制着马尼特及乌兰察布坳陷的形成和发育,使该区构造线多以北东向为主。含铀层赛汉组主要是由基底差异升降运动的背景下沉积形成,除沉积边界受断裂构造控制外,坳陷内受断裂构造影响较小。

在赛汉组沉积时,盆地中东部的马尼特坳陷、乌兰察布坳陷已各自成为统一的“大盆地”独立接受沉积,这一基底构造条件使得本区主要含铀层——赛汉组发育宽缓而稳定^[19]。

苏尼特左旗地区处于马尼特坳陷南西端、乌兰察布坳陷北东端与苏尼特隆起的交会部位(图 1)。

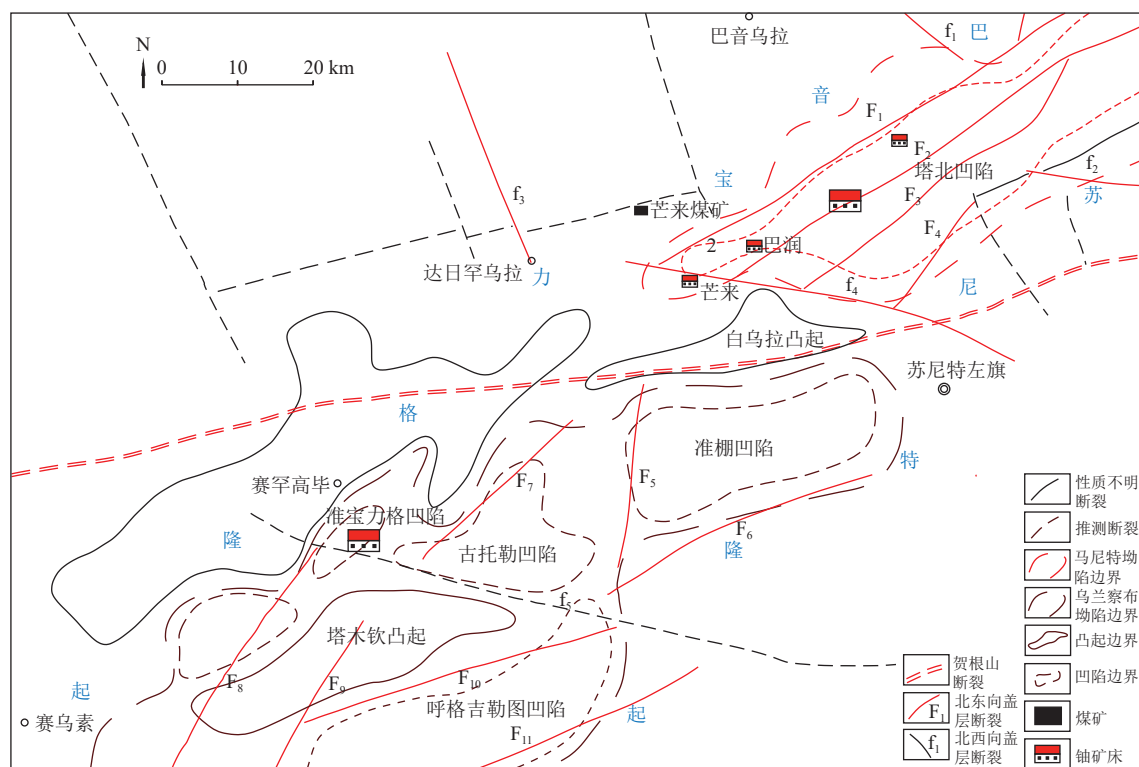


图 1 苏尼特左旗地区构造概要(据石油物探资料修改)

Fig.1 Structural outline map of the Sonid Left Banner (modified after petroleum geophysical data)

矿产方面,二连盆地具有“铀-煤-油”同盆共存的特征,其中石油的生、储层主要为下白垩统阿尔善组(K_1a)和腾格尔组(K_1t),在乌兰察布坳陷、马尼特坳陷内都有分布;煤赋存层位主要有中下侏罗统阿拉坦合力群($J_{1-2}al$)和白垩统赛汉组(K_1s)。产于赛汉组的煤层在盆地内各个坳陷均有分布,煤质以褐煤为主,如苏尼特左旗境内的芒来煤矿;铀与煤在空间上有一定的伴生性,主要产于赛汉组(K_1s)、二连组(K_2e)和古近系下部

脑木根组($E_{1-2}n$),按含矿岩石分类有泥岩型(努和廷矿床、苏崩矿床、查干诺尔矿床)和可地浸砂岩型(赛汉高毕、巴彦乌拉铀矿产地)两种。

现在开采的煤矿有芒来煤矿,位于苏尼特左旗西北 35 km,行政区划隶属达日罕乌拉苏木管辖,有县道 X922 直接到达;区内还有正在开采的砂岩型铀矿巴彦乌拉铀矿,位于苏尼特左旗北部 31 km,有县道 X921 直接到达。

铀成矿模式方面,根据赛汉组晚期构造反转强烈程度可归为3种成矿模式,形成了二连盆地砂岩型铀矿“同盆多类型”的模式。(1)构造反转强烈地区:含矿层被抬升至地表遭受剥蚀,古河谷砂体出露地表,含氧含铀水持续渗入,在砂体中下部形成垂向潜水氧化型铀矿化,以赛汉高毕矿床为代表。(2)构造反转较强烈地区:含矿层遭受差异抬升,部分暴露地表,含氧铀水主要受断裂控制下渗,受侧向潜水—层间氧化作用控制,以巴彦乌拉矿床为代表。(3)构造反转中等程度地区:含矿层一端抬升至地表,另一端向凹陷内倾斜,含矿层保存完整,存在上覆隔水层,主要发育顺向式层间氧化作用,以哈达图矿床为代表^[20]。

控矿因素上,铀矿化主要受辫状河砂体控制,另外,构造、岩石地球化学分带、还原介质、铀源^[21]、古气候、水文地质条件等也对铀矿化的形成起控制作用。

2013—2021年,中国地质调查局天津地质调查中心牵头,联合煤田部门实施了“北方砂岩型铀矿调查工程”,在二连盆地发现了恩格日音和陆海、准栅等多个大型到特大型砂岩型铀矿产地。本研究就是基于在苏尼特左旗的砂岩型铀矿找矿实践。

1.2 铀矿与煤层的关系

1.2.1 成矿过程

在铀的成矿期,微弱的聚煤作用有利于铀成矿,丰富的碳元素等有机物能为铀储层内部提供丰富的还原介质,使溶于水的六价铀化合物迅速地还原为四价的铀而沉积在砂岩之中。局部可能由于沉积丰富而形成铀矿。当薄煤层或炭质泥岩充当铀矿层的顶底板时,还能为铀储层提供强大的外部还原剂。由聚煤作用形成的还原剂(CH_4 和 H_2S)通过制约层间氧化带从而控制铀矿化作用^[22]。

砂岩型铀矿成矿受铀源、构造、地层、岩性—岩相等成矿要素制约,成矿条件相对苛刻,成矿规模较同等级别的煤矿面积要小约一个数量级。

1.2.2 找矿线索

研究区铀矿找矿的重点为寻找“古河道”,即发现了“古河道”也就基本发现了铀矿体^[23-26],矿体明显受古河道砂岩控制,且河道砂岩的规模和砂体厚度与矿体规模和品位呈明显的正相关关系。区域上受顺向氧化—还原过渡带宏观控制,垂向分带明显^[27-28]。同时发现,砂岩型铀矿产出与含煤地层关系密切,空间配置上,铀矿体多发育在含煤凹陷边部煤层尖灭线外侧附近,而含煤凹陷的中心区铀矿体不发育^[29]。

煤田勘查发现的放射性信息是砂岩型铀矿找矿的重要线索,可利用煤田勘查时的钻孔,尤其是煤盆地的边缘地带钻孔的放射性测井信息,提取砂岩型铀矿找矿线索,缩小了砂岩型铀矿找矿范围,提高了找矿效率。

鉴于铀矿体沿走向相对较长,而倾向很窄,应根据砂体展布特征加密补充铀矿勘查钻孔。

2 结果分析

在本次砂岩型铀矿勘查工作中运用了综合地球物理方法。地球物理方法在沉积盆地能源矿产勘查中扮演过重要角色,但铀储层本身密度、电阻率、磁化率等物性差异不明显,表征于地表的找矿信息十分微弱,严重制约了地球物理方法在砂岩型铀矿直接找矿的应用^[11]。

有鉴于此,在充分研究砂岩型铀矿成矿要素的地球物理响应、地球物理方法的原理及特点的基础上,本次从宏观和微观两个层面选择地球物理方法及组合开展间接找矿。

2.1 区域物探方法

充分利用已有资料,包括区域重力及解译成果(基底起伏,如图1为石油部门根据重力划分的拗陷、凹陷等)、二连—东乌旗1:50 000航空物探综合站测量成果(包括航磁、航电、航放等值线平面图)、芒来煤矿预查详查报告及核工业二〇八大队“内蒙古二连盆地中东部地区地浸砂岩型铀矿资源调查评价成果报告”等。

2.1.1 区域重力划定构造格架

重力勘探是利用地下地质体密度差异来研究其分布规律的地球物理方法,具有成本低、工作效率高、工作限制条件少等特点。砂岩型铀矿含矿率在万分之一级别,只能从间接找矿的角度,通过圈定布格重力等值线发生同形扭曲或错断位置,寻找有利于砂岩型铀矿成矿的构造斜坡带、断裂带等位置。尤其是近年来,基底起伏形态影响砂岩型铀矿成矿理论逐渐获得认可。

从收集到的研究区石油部门重力资料及其解译成果可知,二连盆地中东部基底存在非均匀网格化隆—拗结构,基底沉降中心与现今铀矿、油气富集区空间耦合。裂谷活动期(中生代)形成的同沉积断裂为砂岩型铀矿成矿流体提供了运移通道,而基底断裂的再活化则控制了地浸砂岩铀矿体的局部富集。重力异常与断裂构造的对应关系为圈定铀矿靶区提供了关键地球物理依据(图1)。

2.1.2 航磁资料识别了盆地周缘主要岩体

磁法勘探是利用地下地质体磁性差异来研究地质构造和矿产资源或其他探测对象分布规律的地球物理方法,具有轻便易行、效率高、成本低、工作领域广、不受地域限制等特点。随着磁测仪器精度和定位精度大幅提高,航空磁法已成为快速获取区域高精度磁场信息的主要手段。航空磁法可在区域构造划分、岩性划分圈定蚀源区等铀成矿要素方面发挥重要作用,圈定找矿靶区。

从图 2 可以看出,区内磁场以贺根山断裂带为界,分北、中、南 3 个部分。其中北部磁场变化剧烈,为正背景高异常场,异常强度一般为 50~400 nT,局部磁异常杂乱而幅值大,可达 600 nT,似鸡窝状异常较多,走向不稳定,但整体仍具有良好的连续性和分带性,呈

北东或北北东走向,小面积株状正异常集中分布。区域地质资料表明,该磁场由巴音宝力格隆起发育的北东向断裂和巨大的海西、印支期花岗岩体带引起,是二连盆地的北部边界。

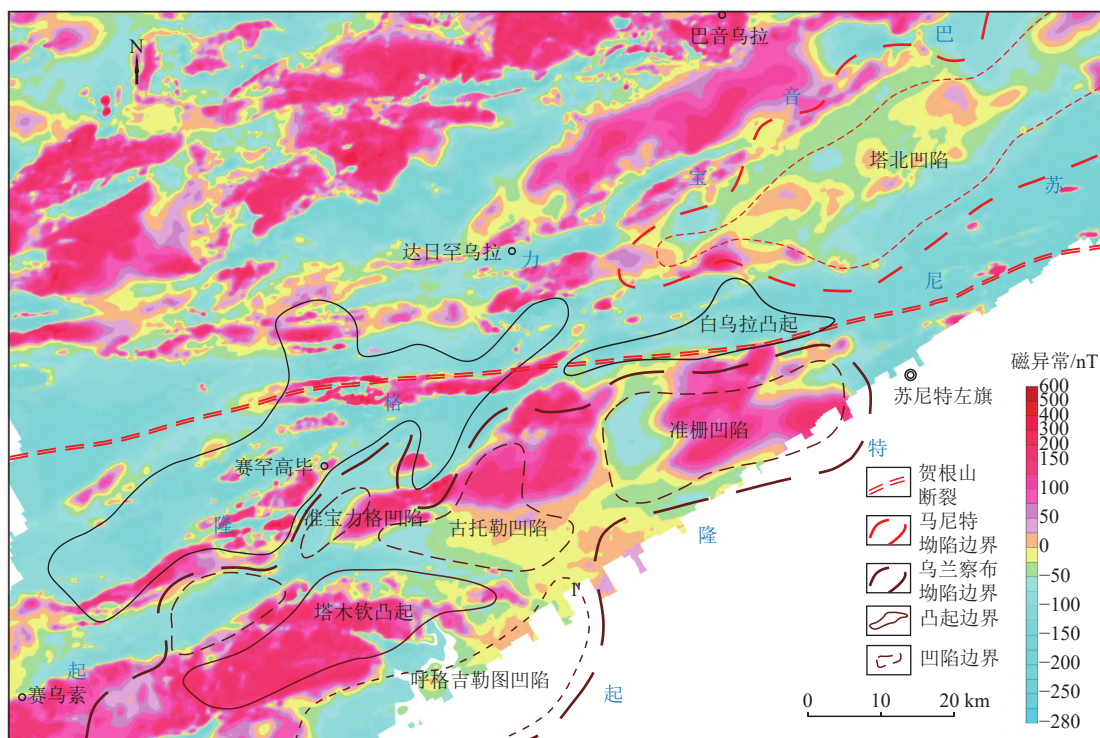


图 2 苏尼特左旗地区航磁化极等值线平面图

Fig.2 Contour map showing reduction to pole (RTP) transformed aeromagnetic anomalies in Sonid Left Banner

南部磁场同样是正背景高异常场,异常强度相对北部巴音宝力格隆起区较低,是苏尼特隆起的反映,岩性以由华力西期的包尔汗喇嘛庙岩体(γ_4^3)和印支期的苏左旗岩体(γ_5^1)构成的复式岩浆岩带为主。南面以西拉木伦河大断裂为界。

间于二者之间的贺根山断裂带则表现负磁场背景的低异常场,异常强度-280~0 nT。

2.1.3 航放资料识别了二连盆地周缘主要含铀岩体分布
放射性勘探是寻找铀矿的重要手段,铀矿床通常情况下是在对放射性异常的地面查证过程中发现的^[30]。

目前,面向铀矿的放射性勘探方法主要有 γ 能谱测量、氡及其子体测量等^[31-32]。其中 γ 能谱测量测定的是地表岩石、土壤以及矿石中放射性元素衰变所释放的 γ 射线强度。优点是经济高效,方便大范围开展,通常以航空物探综合站的形式开展区域测量;缺点是地层和岩体中穿透能力有限,对隐伏砂岩型铀矿效果不佳,仅应用于查明铀成矿环境。放射性物质的传播特性决定了航空放射性测量结果呈现的是蚀源区的放射性异常。

从图 3 可以看到,区内的放射性异常场总道和钍

(晕)的分布受岩性控制(图 3a、图 3c),总体呈现北东-北北东展布。特别是伽马总量场多数分布在蚀源区,北部的巴音宝力格隆起分布有大面积的伽马异常场,异常强度为 $(12\sim 20)\times 10^{-6}$,最高达 50×10^{-6} 。南部的苏尼特隆起仅分布几个孤立的伽马异常,而处于能谱总道低背景场贺根山断裂带拗陷或凹陷区,呈现了铀异常晕(图 3b),说明铀从蚀源区向盆内具有明显的迁移。

从而奠定了本区北部巴音宝力格隆起大范围蚀源区和南部孤立岩株向中部迁移铀元素的放射性特征^[33]。

2.2 地面物探

为进一步缩小找矿范围实现找矿突破,需要更多有利的成矿要素被证实,如厚而连续的砂体、有利的含氧含铀流体的径流、蚀源区含氧含铀流体需要地形差、剥蚀窗口(“天窗”)进入砂体,经还原剂由 U^{6+} 变成 U^{4+} ,需要水力梯度或粒径的改变沉淀下来,这些都需要微观尺度的精确探测,地震勘探和地面土壤氡气测量正是这样的地球物理手段。

2.2.1 二维地震准确定位盆地含铀砂岩的空间分布

地震勘探时深对应关系明确,解释成果有地层、构

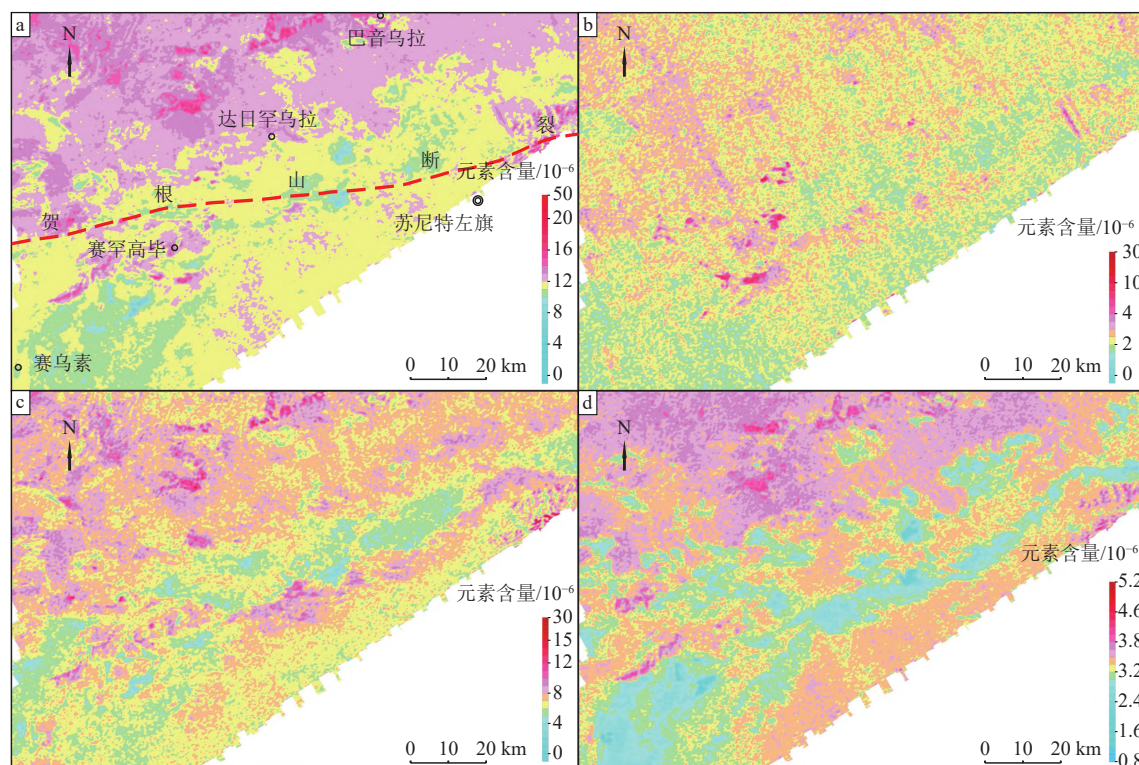


图3 苏尼特左旗地区能谱总道、铀、钍、钾含量等值线(a、总道; b、铀; c、钍; d、钾)

Fig.3 Contour maps of the γ -ray spectra-derived total radioactive anomalies (a) and the uranium, thorium, and potassium contents (b, c, and d) in Sonid Left Banner

造等,可以获得更加精确的地质层位信息,还可以从地震动力学特征入手提取相关属性,如氧化还原反应引起含矿砂体松散,在时间剖面上表现为同相轴能量衰减;可借鉴石油、煤炭部门成熟技术开展波阻抗重构技术^[30]。

另外,煤铀空间关系决定了可以通过能量强的煤层同相轴(密度小速度低)来追踪储铀砂层,一定程度上克服储铀砂层物性差异小的缺陷^[11]。

为掌握工作区各拗陷、隆起及次一级凹陷和凸起的精确构造,寻找有利成矿位置,解析砂岩型铀矿成矿相关的蚀源区、砂岩、含氧含铀流体、构造“天窗”等地质要素,在工作区共布设了6条共130 km二维地震剖面(图4)。

结合目的层埋深等情况^[34],采取了宽频激发、小面元、高覆盖、高精度静校等措施提高砂岩型铀矿地震质量(表1)。

本次二维地震工作共追踪解释了7个界面(图5),其中 T_2 、 T_3 、 T_m 、 T_4 为主要关注层位,以下是区内典型地震测线N17线的解释结果。

(1) T_2 为古近系伊尔丁曼哈组层底界面,是研究区内分布范围最广的一个层面,其与下伏上白垩统赛汉组上段呈不整合接触,同相轴中强振幅、中高频,较稳定,反射时间160~220 ms,埋深26~54 m。

(2) T_3 为下白垩统赛汉组上段与赛汉组中段的分

界面,中低频、中弱振幅,连续性较差,反射时间160~330 ms,埋深61~210 m。

(3) T_m 为含煤地层底板或炭质泥岩反射,2条反射同相轴高频、强振幅、连续性好、相位清晰,反射时间200~390 ms,埋深40~205 m。

(4) T_4 为赛汉组中段与赛汉组下段的分界面,同相轴中低频、中弱振幅、连续性较差,反射时间170~420 ms,埋深65~310 m。

(5) T_5 为赛汉组下段与腾格尔组的分界面,同相轴中低频、中弱振幅、连续性较差,反射时间180~480 ms,埋深80~350 m。

(6) T_6 为腾格尔组与阿尔善组时间地层的分界面,同相轴中低频、中弱振幅、连续性较好,反射时间200~720 ms,埋深100~810 m。

(7) T_8 为白垩系与下伏古生界的分界面,多条同相轴低频率、强振幅、连续—断续,上和下部均存在反射终止现象,表现为不协调接触关系,反射时间240~750 ms,埋深200~920 m。

经时深转换,绘制了N17线地质剖面图(图6),由图6可知,N17线从马尼特拗陷的塔北凹陷向南东方向,经苏尼特隆起进入乌兰察布拗陷的准栅凹陷。 F_2 对应图1中的 f_4 ,规模相对较大,为边界断层,控制着拗陷与白乌拉凸起的分界; F_{10} 对应图1中的贺根山断裂,控制

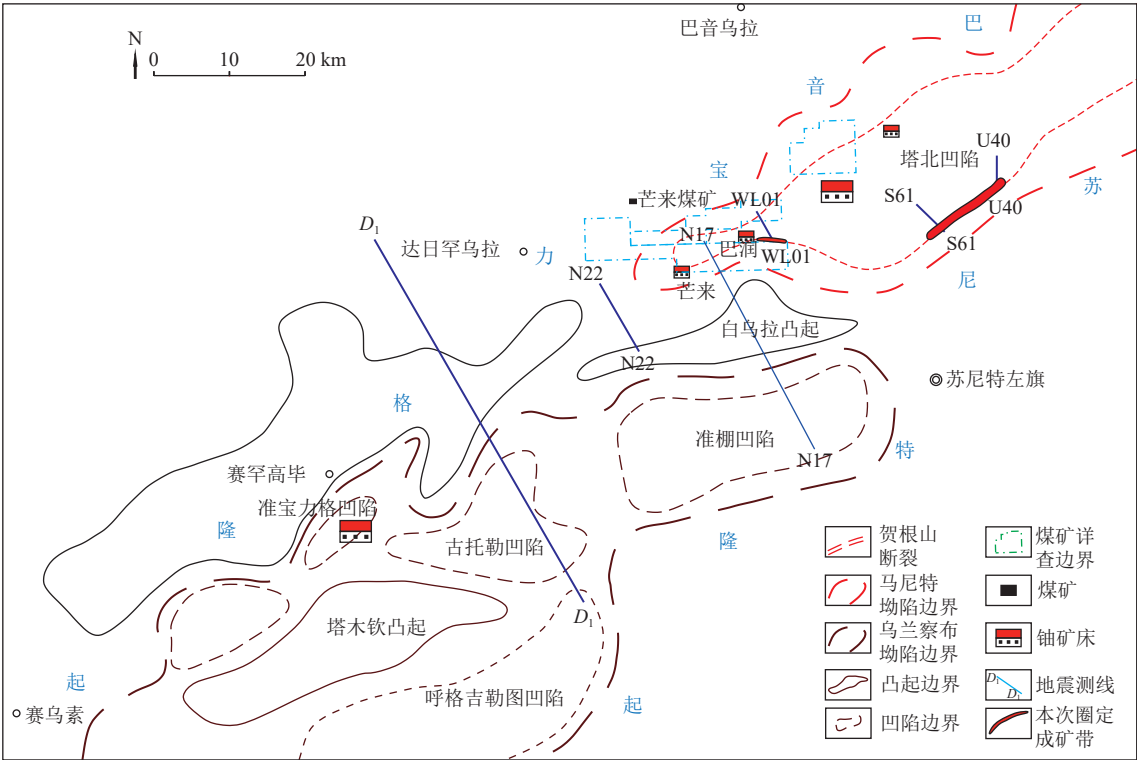


图 4 苏尼特左旗二维地震布置
Fig.4 Arrangement of 2D seismic profiles in Sonid Left Banner

表 1 二维地震采集参数
Table 1 Parameters for 2D seismic data acquisition

参数名称	描述	参数名称	描述
排列方式	线性排列	叠加次数	2
道间距/m	5	扫描长度/s	14
炮检距/m	10	扫描频率/Hz	10~110
接收道数	160	驱动幅度/%	70
观测形式	中间激发	接收仪器	法国Sercel 428XL
覆盖次数	40	采样间隔/ms	0.5
最大炮检距/m	397.5	记录长度/s	2
面元/(m×m)	2.5×2.5	高低截频	全通
震源类型	美国T15000-Minivib12(5 t)	检波器组合	4只60 Hz高频检波器(2串2并)

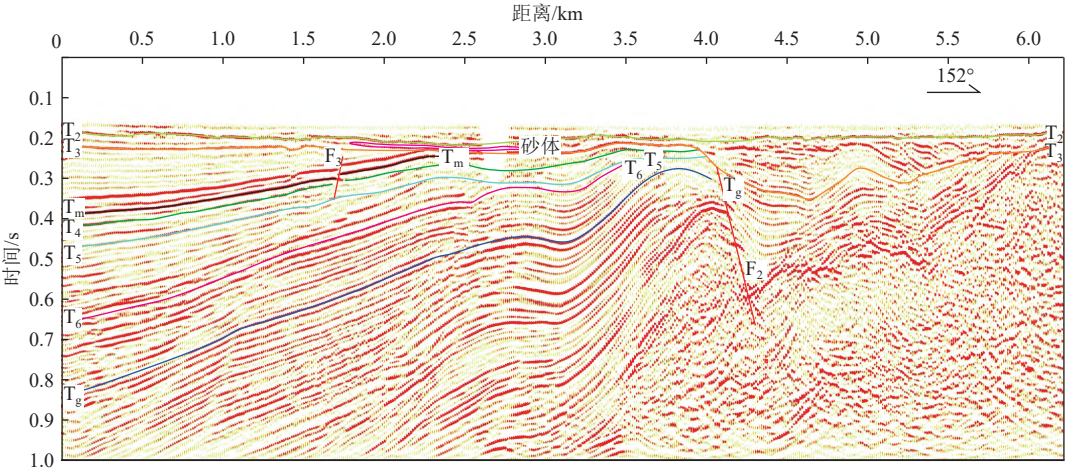


图 5 苏尼特左旗 N17 线二维地震时间剖面
Fig.5 2D seismic time profile along exploration line N17 in Sonid Left Banner

着马尼特及乌兰察布坳陷的形成和发育。其界线与石油系统通过重力反演划定的界线大致吻合,区别在贺根山断裂的位置较图1偏南,以二维地震解释成果为准。这一段苏尼特隆起还可以细分为白乌拉凸起和两侧的

次级凹陷。古近纪以后的新构造表现为宽缓褶皱和断裂,形成左侧地层向北西向倾斜,平均坡度 3.55° ,形成 F_3 断裂,切断煤层,落差为8 m。

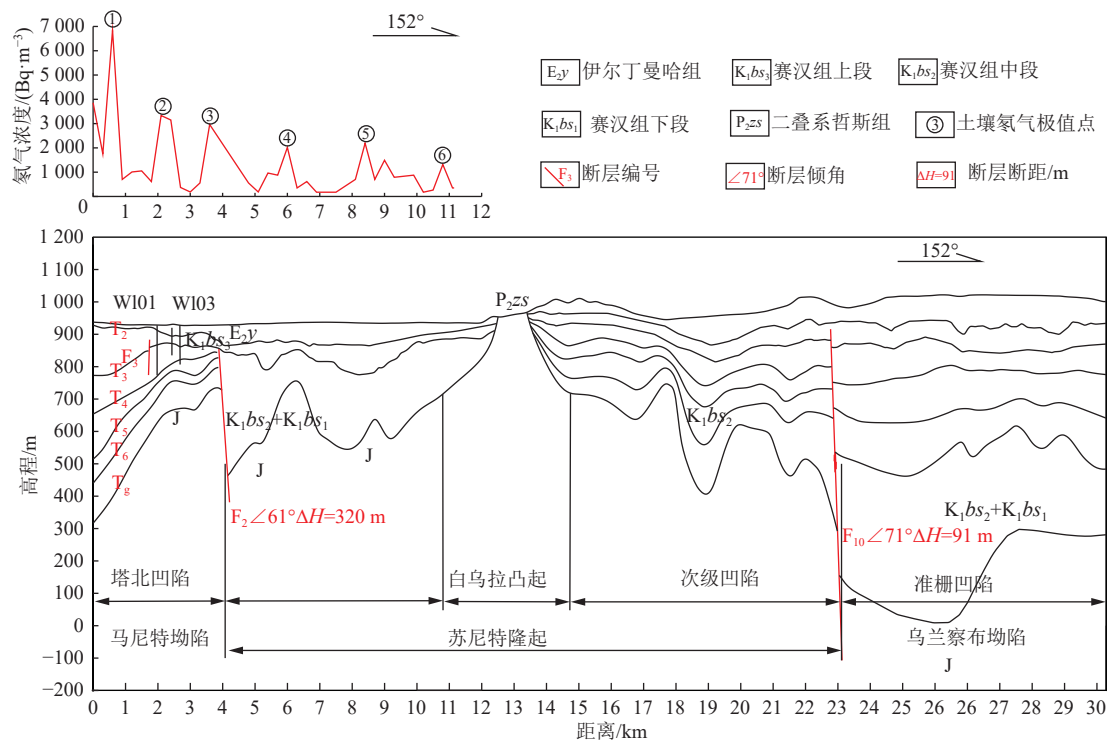


图6 苏尼特左旗N17线地震地面氡气综合剖面

Fig.6 Comprehensive profile showing the seismic interpretation and soil radon measurement of exploration line N17 in Sonid Left Banner

结合图5和图6,以地震剖面解析砂岩型铀矿成矿相关的蚀源区、砂岩、含氧含铀流体、构造“天窗”等地质要素。

(1) 地层及砂体。断层 F_2 左右两侧沉积形态和厚度存在很大的差别,断层左侧的马尼特坳陷同相轴较丰富,从浅到深包含了古近系伊尔丁曼哈组、下白垩统赛汉组(共三段,其中中段含煤,且煤层在断层附近尖灭)、腾格尔组、阿尔善组;断层右侧同相轴较少,推断为苏尼特隆起上的次级凹陷,在赛汉组之前一直独立接受沉积。而在赛汉组之后慢慢跟马尼特坳陷中的次级凹陷一起接受沉积。含铀砂层经氧化还原反应,质地变疏松,在地震动力学特征上表现为反射能量大幅降低,由此圈定了有利含铀砂体。

(2) 蚀源区构造“天窗”。晚白垩世受燕山晚期运动二连盆地东抬西降的影响,工作区内整体以抬升为主,古气候以干旱、半干旱为主,大部分地区不仅未接受上白垩统沉积,赛汉组早期的沉积物也露出地表遭受剥蚀,形成构造“天窗”,作为蚀源区的巴音宝力格隆起和苏尼特隆起依然具有相对较高的地势,其含铀岩体(层)的剥蚀物随着大气降水的补给,形成含氧含铀水的就近渗

入并沿河道砂体运移,成为二连盆地重要的成矿期,易于形成潜水或潜水-层间氧化型矿体。

尽管巴音宝力格隆起和苏尼特隆起岩体富含放射性元素,但从岩体品位 10^{-6} 富集至成矿的 10^{-4} ,需要一个不间断的补径排系统及源源不断的还原物质,这样就需要切穿煤层或切断含铀煤层的断裂。

以N17线为例,白乌拉凸起始终处于剥蚀状态一直到现代,其地表出露 P_2zs ,富含放射性元素,可作为砂岩型铀矿的蚀源区即物质来源,形成含铀含氧流体作为近源向北西方向垂直输入马尼特坳陷。这样 F_2 与 F_3 之间区域加上白乌拉凸起的放射性岩层就组成了物源-砂体-构造天窗-还原物质通道等成矿有利条件。为此在 F_2 断裂附近开展了土壤氡气测量。

2.2.2 氡气测量准确示踪含铀砂体的赋存状态

氡作为镭的第一代衰变子体,直接反映镭的存在特征。埋藏在深部的铀矿体经衰变和迁移在一定范围内形成氡及其子体“地球化学晕”,故测量氡及其子体异常值以提取深部铀成矿信息被寄予厚望。包括活性炭测氡法、土壤天然热释光法、 ^{210}Po 法及 ^{218}Po 法等^[31]。

在砂岩型铀矿成矿的“泥-砂-泥”构造理论中,上

覆泥岩基本屏蔽了矿(化)体放射性物质通过正上方上逸,仅能通过附近的断裂构造上逸。放射性异常与矿体的空间对应关系被定义为异常梯级带上,既有高于背景的放射性异常,又将放射性异常定义为矿体经断裂构造的反映,向异常减弱的方向寻找隐伏的铀矿体^[22]。在矿体埋藏深度浅,隔水顶板不发育的情况下,土壤氦气测异常对区内砂岩型铀矿找矿具有良好的指示作用。

通过模型分析,土壤氦气异常往往位于铀矿体上游一侧,矿体上方大多为氦气背景值,而矿体下游一侧多为氦的偏高晕^[35]。

本次氦气测量工作采用的是土壤瞬时测氦法,仪器采用 HDC-C 测氦仪。该仪器采用负高压静电吸附法,采集器使用双向探测结构,采样介质使用 α 射线可以穿透的薄膜材料,通过对采集的氦子体进行 α 谱测量,获得氦的浓度和氦与其子体的平衡因子,从而确定土壤氦浓度,具有探测效率高、操作简便、使用难度低等优点。

根据土壤氦气剖面(图 6,野外施工点距 500 m)可知,测量曲线背景值约 1 000 Bq/m³,异常呈多峰形态,最高值 6 842 Bq/m³,其中②、③、④号峰值推断为 F₁₀、6 km、9 km 处地层尖灭引起的异常,②号异常更符合“砂岩型铀矿放射性物质多被上覆泥岩屏蔽,仅能通过附近的断裂构造上逸”的模型,为此对②号异常并钻探验证,布设了 WL01、WL02、WL03 三个钻孔,孔深分别为 153.30、85.11、118.30 m。

结合图 7a 和图 5,钻探编录分层与二维地震的吻

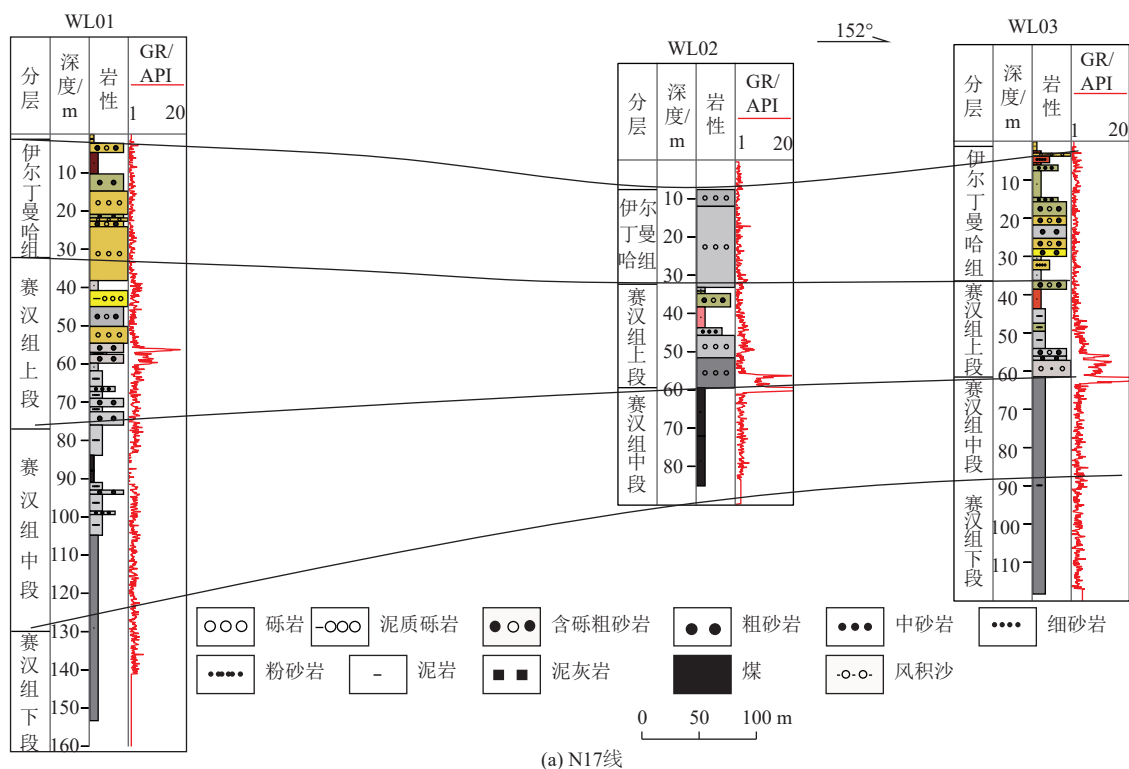
合程度较高,含矿层岩性为含砾粗砂岩,砂砾结构,层状构造,含砾 5%~10%,砾径 2~5 mm,石英为主,分选磨圆较差,次棱角状,杂基支撑。含矿层均具有疏松的特征。空间配置上,顶板为泥质粉砂岩-泥岩,底板为泥岩或煤层,均形成“泥-砂-泥”构造。同时仅 WL01 含煤层,厚度约 9 m, WL02、WL03 不含煤,对应层位为致密泥岩,颜色为黑色-灰黑色。体现了不断靠近凹陷边缘的沉积特征。赛汉组中段沉积差异及后期抬升后剥蚀程度的差异,变化剧烈,由于该部位处于构造“天窗”,从图 7a 可以看到,尽管只是矿化孔,但找矿思路是正确的。

依据这一思路沿着拗陷边界布置了 S61、U40、WL01 三条地震剖面及土壤氦气测量,经钻探验证,均发现工业矿体(图 7b),连接每条地震剖面对应的 F₂、F₃,可圈定铀成矿带,长约 20 km,宽 1~3 km,形态与马尼特拗陷南部边界高度吻合(图 4)。

因此,寻找接近盆缘且具有地形优势及铀源岩体的位置对砂岩型铀矿找矿工作很有利。

3 结论

(1) 通过区域重力、航磁、航放、二维地震及土壤氦气测量等地球物理方法对与砂岩型铀矿成矿密切相关的铀源、构造、地层、岩性-岩相等地质要素的地球物理响应进行研究。其中重力、航磁、航放作为区域宏观把握,划定找矿靶区,二维地震及土壤氦气测量作为微观精确控制,找到工业矿体。



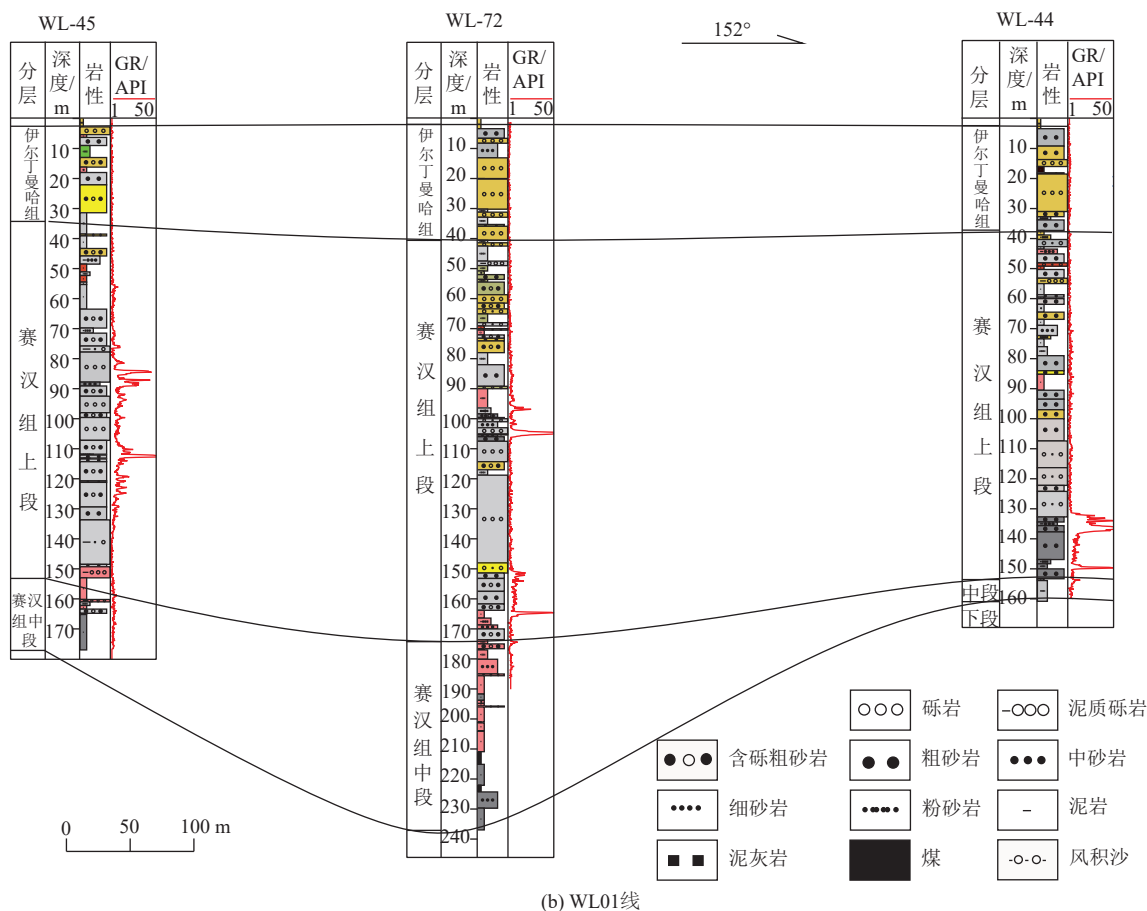


图 7 苏尼特左旗典型连井剖面

Fig.7 Well-correlation section of exploration line N17 and WL01 in Sonid Left Banner

(2) 勘查实践中,重力反演明确了基底隆-坳结构与铀矿富集的耦合关系,航磁与航放识别出苏尼特隆起和巴音宝力格隆起两大蚀源区,圈定了蚀源区及铀元素迁移路径,二维地震精细刻画了含铀砂体的空间分布,构造“天窗”信息,土壤氦气测量直接验证了矿化异常。

(3) 构建了宏观背景到微观定位的完整技术体系,在马尼特拗陷南部即含煤凹陷边缘的煤层尖灭带外侧成功圈定了一条长约 20 km、宽 1~3 km 的新铀成矿带。钻探验证显示,该区域土壤氦气异常峰值与铀矿赋存位置高度吻合,进一步验证了该技术体系在隐伏铀矿定位中的有效性。

(4) 本次勘查实践为含煤盆地铀矿勘查提供了可复制的技术模式,为“煤铀兼探”策略提供了理论依据。该技术体系在二连盆地的成功应用,为我国北方含煤盆地砂岩型铀矿资源开发提供了重要参考,对其他类似地质条件的铀矿勘查具有示范意义。

致谢: 本文写作过程中得到天津地质调查中心冯晓曦、孟利山正高级工程师,徐增连高级工程师及呼和浩特自然资源综合调查中心李成元高级工程师的指导与帮助,在此予以感谢。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] SUN L, ZHANG Yuchao, ZHANG T, et al. Jurassic sporopollen of Yan'an Formation and Zhiluo Formation in the northeastern Ordos Basin, Inner Mongolia, and its paleoclimatic significance[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 32–51.
 - [2] JIN Ruoshi, LIU Huajian, LI Xiaoguang. Theoretical system of sandstone-type uranium deposits in Northern China[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(2): 257–277.
 - [3] JIN Ruoshi, FENG Xiaoxi, TENG Xueming, et al. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng uranium orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. China Geology, 2020, 3(1): 52–66.
 - [4] 程银行, 金若时, 苗培森, 等. 砂岩型铀矿的两种成矿模式: 涪川式和塔勒式[J]. 地球科学, 2025, 50(1): 46–57.
 - [5] 吕永华, 刘武生, 康世虎, 等. 乌兰察布坳陷赛汉组下段铀成矿地质条件及找矿方向[J]. 铀矿地质, 2019, 35(5): 273–281.
- LYU Yonghua, LIU Wusheng, KANG Shihu, et al. Geological

- conditions of uranium metallization and prospecting of the lower member of Saihan Formation in Wulanchabu depression[J]. Uranium Geology, 2019, 35(5): 273–281.
- [6] 郝金龙, 邓洪泽, 陈宁. 感应测井技术在哈萨克斯坦铀矿山地浸采铀中的应用[J]. 铀矿地质, 2022, 38(4): 781–788.
- HAO Jinlong, DENG Hongze, CHEN Ning. Application of induction logging technology in in-situ leaching of uranium mines in Kazakhstan[J]. Uranium Geology, 2022, 38(4): 781–788.
- [7] 俞祁安, 司庆红, 彭胜龙. 砂岩型铀矿综合探测技术和实践: 以二连盆地 BYH 铀矿为例[J]. 华北地质, 2024, 47(3): 23–35.
- YU Reng'an, SI Qinghong, PENG Shenglong. Comprehensive exploration techniques and practices for sandstone type uranium deposit: A case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin[J]. North China Geology, 2024, 47(3): 23–35.
- [8] 宋亮, 柯丹, 顾大钊, 等. 尼日尔 Azelik 砂岩型铀矿勘查中土壤氦气测量方法应用研究[J]. 世界核地质科学, 2015, 32(4): 237–242.
- SONG Liang, KE Dan, GU Dazhao, et al. Study on application of soil radon survey method in the exploration for sandstone type uranium deposit in Azelik, Niger[J]. World Nuclear Geoscience, 2015, 32(4): 237–242.
- [9] 李长波, 王良书, 孙斌. 松辽盆地布格重力异常小波多尺度分解与解释[J]. 高校地质学报, 2014, 20(2): 268–276.
- LI Changbo, WANG Liangshu, SUN Bin. Interpretations of Bouguer gravity anomaly with the method of wavelet multi-scale decomposition (WMD) in Songliao Basin, Northeast China[J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(2): 268–276.
- [10] 刘殿秘, 韩立国, 翁爱华, 等. 松辽盆地西北边界部分地球物理特征[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1722–1727.
- LIU Dianmi, HAN Ligu, WENG Aihua, et al. Partial geophysical features of the northwest boundary in Songliao Basin[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1722–1727.
- [11] 封志兵, 聂冰峰, 聂逢君, 等. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1179–1188.
- FENG Zhibing, NIE Bingfeng, NIE Fengjun, et al. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1179–1188.
- [12] 黄建乐, 陈晓冬, 李家金, 等. 综合物探法在砂岩型铀矿中深部找矿中的实践与分析: 以新疆昭苏盆地为例[J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 1099–1106.
- HUANG Jianle, CHEN Xiaodong, LI Jiajin, et al. Prospecting middle and deeply buried sandstone-type uranium deposits beneath the Zhaosu Basin, Xinjiang by integrated geophysical methods[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5): 1099–1106.
- [13] 江民忠, 李名松, 谢迎春, 等. 地浸砂岩型铀矿床微磁异常研究及其找矿意义[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 49–54.
- JIANG Minzhong, LI Mingsong, XIE Yingchun, et al. Study on micro-aeromagnetic anomaly over in-situ leachable sandstone type uranium deposit and its prospecting significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3): 49–54.
- [14] 汪硕, 师钦俊, 许振宁, 等. 基于机器学习的 SIP 数据砂岩型铀矿氧化-还原带识别研究[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(5): 969–976.
- WANG Shuo, SHI Qinjun, XU Zhenning, et al. Machine learning of identifying the redox transitional zone by SIP data in sandstone-type uranium deposits[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(5): 969–976.
- [15] 俞祁安, 孙大鹏, 周小希, 等. 基于自然伽马测井数据的铀资源评价方法研究: 以鄂尔多斯盆地彭阳铀矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 144–152.
- YU Reng'an, SUN Dapeng, ZHOU Xiaoxi, et al. Preliminary investigation of uranium resource evaluation method based on natural gamma logging data: A case study of the Pengyang uranium deposit in Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 144–152.
- [16] 刘晓雪, 俞祁安, 曹惠锋, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘含煤区砂岩型铀矿成矿条件[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 26–32.
- LIU Xiaoxue, YU Reng'an, CAO Huifeng, et al. Metallogenic conditions of sandstone uranium deposits in the coal-bearing area on the southeastern margin of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 26–32.
- [17] 张云, 张天福, 孙立新, 等. 鄂尔多斯盆地南缘黄陵地区煤铀兼探钻孔数据集成与三维地质模型构建[J]. 中国地质, 2020, 47(增刊 1): 231–240.
- ZHANG Yun, ZHANG Tianfu, SUN Lixin, et al. Integration of borehole data and 3D geological modeling of the Huangling area on the southern margin of the Ordos Basin based on coal-uranium joint exploration[J]. Geology in China, 2020, 47(Sup.1): 231–240.
- [18] 聂逢君, 严兆彬, 李满根, 等. 二连裂陷盆地“同盆多类型”铀矿[M]. 北京: 地质出版社, 2019.
- [19] 杨建新, 梁齐端, 何大兔, 等. 内蒙古二连盆地中东部地区地浸砂岩型铀矿资源调查评价成果报告[R]. 包头: 核工业二〇八大队, 2011.
- [20] 秦彦伟. 二连盆地巴赛齐地区下白垩统赛汉组古河谷氧化带特征与铀成矿[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- QIN Yanwei. Characteristics of paleo-valley oxidation zone and uranium mineralization of Lower Cretaceous Saihan Formation in Basaiqi area, Erlian Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [21] 聂逢君, 夏菲, 严兆彬, 等. 二连盆地西部隆起区卫境岩体铀丢失与盆内铀矿成矿关系探讨[J]. 地球学报, 2022, 43(5): 616–632.
- NIE Fengjun, XIA Fei, YAN Zhaobin, et al. Study on uranium loss of Weijing granite and sandstone-type uranium mineralization in Erlian Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 616–632.
- [22] 胡航. 煤田资料在松辽盆地绍根地区铀矿勘查中的二次应用及找矿远景预测[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(7): 18–24.
- HU Hang. Secondary development of coalfield data for uranium exploration and exploration prospect in Shaogen area of Songliao Basin[J]. Coal Geology of China, 2024, 36(7): 18–24.
- [23] 郭宏伟. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- GUO Hongwei. Studies on characteristics and regularity of metallogenesis of Bayanwula uranium deposits, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [24] 韩效忠, 胡航, 吴兆剑, 等. 马尼特拗陷准棚地区赛汉组沉积特征及其对铀成矿的控制作用[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(12): 16–22.
- HAN Xiaozhong, HU Hang, WU Zhaojian, et al. Sedimentary features of Saihan Formation and its controlling on uranium mineralization in Zhunshan area, Manit depression[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(12): 16–22.
- [25] 林中湘. 砂岩型铀矿找矿目标层识别技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(8): 49–53.
- LIN Zhongxiang. Study on sandstone type uranium deposit pro-

- specting target identification technology[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(8): 49–53.
- [26] 蒋喆, 韩效忠, 胡航, 等. 二连盆地恩格日音砂岩型铀矿床地质特征及成矿作用初探[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(4): 742–753.
- JIANG Zhe, HAN Xiaozhong, HU Hang, et al. Geological characteristics and ore-forming process of the Engeriyin large sandstone-type uranium deposit in the Manite depression, Erlian Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(4): 742–753.
- [27] 陈宏斌, 徐高中, 王金平, 等. 鄂尔多斯盆地南缘店头铀矿床矿化特征及其与东胜铀矿床对比[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 724–732.
- CHEN Hongbin, XU Gaozhong, WANG Jinping, et al. Mineralization characteristics of Diantou uranium deposit in the southern margin of Ordos and in comparison with Dongsheng uranium deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 724–732.
- [28] 曹惠锋, 刘厚宁, 杜鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘双龙铀矿床地质特征及铀矿物类型探析[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(5): 148–153.
- CAO Huifeng, LIU Houning, DU Peng, et al. Characteristics of Shuanglong uranium deposit and the types of uranium mineral in the southern margin of Ordos Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(5): 148–153.
- [29] 韩效忠, 林中湘, 吴兆剑, 等. 中-新生代盆地煤铀协同勘查及对策建议[J]. *地质论评*, 2022, 68(3): 945–954.
- HAN Xiaozhong, LIN Zhongxiang, WU Zhaojian, et al. Co-exploration of coal and uranium and related policy suggestions[J]. *Geological Review*, 2022, 68(3): 945–954.
- [30] 申科峰, 杨建新, 侯树仁, 等. 内蒙古中新生代主要含铀沉积盆地找矿突破技术思路及其成果扩大方向[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1304–1313.
- SHEN Kefeng, YANG Jianxin, HOU Shuren, et al. Uranium prospecting breakthrough, achievement expanding and prospecting orientation in main Mesozoic–Cenozoic sedimentary uranium basins of Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1304–1313.
- [31] 张凯, 付锦, 龚育龄, 等. 主要放射性物探方法在砂岩型铀矿勘查中的应用分析[J]. *世界核地质科学*, 2015, 32(1): 46–50.
- ZHANG Kai, FU Jin, GONG Yuling, et al. Analysis on the application of major radioactive geophysical methods for sandstone type uranium deposits[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2015, 32(1): 46–50.
- [32] 杨龙泉, 李必红, 赵丹, 等. 铀矿体上方均匀覆盖层中氡迁移的数值模拟[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(5): 441–452.
- YANG Longquan, LI Bihong, ZHAO Dan, et al. Numerical simulation for radon migration in the homogeneous overburden layer above uranium ore body[J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(5): 441–452.
- [33] 韩效忠, 吴兆剑, 司马献章, 等. 二连盆地马尼特坳陷南北双向供源铀成矿模式探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(6): 1–10.
- HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, SIMA Xianzhang, et al. Metallogenic model of uranium with source supply from the south and the north in Manite depression of Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(6): 1–10.
- [34] 吴曲波, 陈聪, 杨龙泉, 等. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿综合地球物理响应特征研究[J]. *地质学报*, 2021, 95(8): 2521–2536.
- WU Qubo, CHEN Cong, YANG Longquan, et al. Study of integrated geophysical characteristics of paleo-valley sandstone-type uranium deposits in the middle of the Erlian Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(8): 2521–2536.
- [35] 刘武生, 李必红, 史清平, 等. 二连盆地砂岩型铀矿土壤氡异常模型及应用[J]. *物探与化探*, 2015, 39(2): 234–239.
- LIU Wusheng, LI Bihong, SHI Qingping, et al. Model and application of radon anomaly in soil of sandstone type uranium deposits in Erlian Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(2): 234–239.

(责任编辑 聂爱兰)